

熱・水分移動特性の観点からみた ゴールボール用パンツのプロテクター素材に関する研究

坂下 理穂¹・加藤 礼菜¹・諸岡 晴美²

Protective Material with Excellent Thermal Comfort for Goalball Pants

Riho Sakashita, Reina Kato, Harumi Morooka

This study investigates the properties of protective pants with excellent thermal comfort for goalball players. The thermal and water-vapor transfer properties of six types of protective materials and two kinds commercial materials for protective pants used by football goalkeepers were measured. We determined that the amount of dry heat loss (H_d) and water-vapor permeability (V_w) of reticular-structured elastomer samples were higher than those of the other samples. H_d was found to be independent of the apparent density of the protective material. Moreover, the V_w values of the urethane sponges were higher than those of the rubber sponges because the latter contain independent pores whereas the former contain continuous ones. The material in contact with the skin was found to be important when two or three sample layers were combined, with the reticular-structured sample or urethane sponge determined to be favorable. This suitability is attributed to the properties of these materials, as they both suppress increases in temperature and humidity in clothing throughout the duration of a goalball game.

1. 緒 言

ゴールボールは、視覚障害者を対象にしたパラリンピック競技の一つである。ボールの中に入っている音源を頼りに、9 m 幅のゴール前で1チーム3人全員がディフェンスする。サッカーと類似した競技であるが、屋内競技であり、相手チームと交互にボールを投げ込む点が異なる。ボールが投げ込まれるたびに床面に横たわり、四肢を大きく広げてディフェンスを行う。ディフェンスのフォームは競技者によって異なり、滑り込むようにして横たわるものもいれば、跳ねるようにしてゴール前に身を投げ出してディフェンスするものもある。その時の腰部は床面に打ち付けられることになり、衝撃を緩和するために、腰部と膝部に

プロテクターが入ったサッカーのゴールキーパー用パンツを着用しているものが多い。しかしながら、ゴールボールは床面であり、サッカーグラウンドよりも硬く、専用のプロテクター付きパンツの開発が望まれている。

筆者らは別報¹⁾において、ゴールボール用プロテクター付きパンツの開発を目的として、圧衝撃吸収からみたプロテクター素材の検討を行った。その結果、従来のサッカー用キーパーパンツのプロテクターでは不十分であることを明らかにした。また、種々の素材からなるプロテクター素材の圧縮特性および圧衝撃緩和性を測定し、10 mm 厚のエラストマーからなる網状構造体の両サイドを5 mm 厚のウレタンスポンジで挟んだプロテクターが最も圧衝撃緩和性が高く、競技試技における接触圧が低くなることを明らかにした。

¹ 本学大学院生 ² 本学教授

一方、ボールが投げ込まれるたびに、転倒と起き上がりを繰り返すゴールボール競技においては、温熱的負荷が非常に大きい。しかしながら、先行研究においては、高齢者の転倒による骨折予防を目的としたヒッププロテクターの衝撃吸収力に関する研究^{2~4)}がみられるのみであり、温熱的観点からプロテクター素材を検討したものは見当たらない。

そこで本研究では、別報で使用した8種のプロテクター素材を用いて、熱・水分移動特性の観点からゴールボール用パンツに取り付けるに適したプロテクター素材を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

(1) プロテクター素材（試料）

プロテクター素材として、別報¹⁾と同様に、表1に示す8種の試料を検討した。試料a～fは厚さ約10mmのものを選択した。試料a、b、cはエラストマーからなる三次元網状構造体のもの（東洋紡㈱・プレスエアー[®]、以降、網状構造体とする）⁵⁾である。座席やベッドのクッション材として使用されている大きな直通気孔をもった素材である。試料aおよびbは中空繊維、cは中実繊維であり、見かけ密度が異なる。試料dはゴムスポンジ、試料eおよびfはウレタンスポンジである。試料gおよびhは市販のサッカー用パンツから取り出したスポンジであり、厚さはそれぞれ約5.7mm、8.6mmであった。

表1 クッション素材の構造特性

| 試料 | | | 重さ (kg/m ²) | 厚さ (mm) | 見かけ密度 (kg/m ³) |
|----|--------|-------|----------------------------|------------|-------------------------------|
| 記号 | 材料 | 構造 | | | |
| a | エラストマー | 網状構造体 | 0.738 | 11.113 | 66.4 |
| b | | | 0.523 | 10.752 | 48.7 |
| c | | | 0.508 | 11.325 | 44.9 |
| d | ゴム | スポンジ | 1.476 | 10.947 | 134.8 |
| e | ウレタン | | 0.245 | 10.400 | 23.6 |
| f | | | 0.410 | 9.990 | 41.1 |
| g* | ウレタン | スポンジ | 0.146 | 5.713 | 25.5 |
| h* | | | 0.235 | 8.555 | 27.4 |

* 市販のゴールキーパー用パンツ

(2) 熱・水分移動特性の測定

サーモラボⅡ（カトーテック㈱製）を用い、20℃65%RHの恒湿恒温室で、熱板温度を人の平均皮膚温に近似した33℃として測定を行った。この時、熱板がドライの場合の熱移動特性（Dry法）、不感蒸散あるいは汗の蒸散をシミュレーションして水蒸気移動を伴う場合の熱移動特性（Wet法）を測定した。水蒸気移動を伴う系の設定は、熱板の上に200%水分率のろ紙を設置し、その上に透湿防水布を設置したものを模擬皮膚として、その上に試料を設置して測定した。原理図を図1に示す。

また、A. 試料の上面からのみの特性を捉えるために、試料と同等の厚さの枠を用いて、側面からの熱・水分移動を防いだ閉鎖系（以降、閉鎖系とする）、B. 試料の側面からの熱・水分移動を含む特性を測定するために、枠を用いなくて開放した系（以降、開放系とする）について測定を行った。

(3) 模擬皮膚と試料との間の温湿度測定

前述のサーモラボⅡの熱板上に設置した模擬皮膚と試料との間の温湿度を測定した。試料が1枚（単層）での測定では、試料の側面からの熱・水分移動を防ぐために、試料の厚さとほぼ同様の発泡スチロール枠で閉鎖した。また、試料の種々の組み合わせによる2層および3層の実験においては枠を用いなくて開放系にて測定した。測定には温湿度センサーとして高精度8チャンネルデータロガーN543（日機装サーモ㈱製）を用い、インターバル1秒でデータを取得した。

3. 結果と考察

3.1 閉鎖系を用いた場合のプロテクター素材の熱・水分移動特性

(1) Dry法による熱移動特性

Dry法における熱移動量（乾熱損失量 H_d ）と見かけ密度 A_p との関係を図2に示す。試料a～c



図1 プロテクター素材の熱・水分移動特性（閉鎖系）

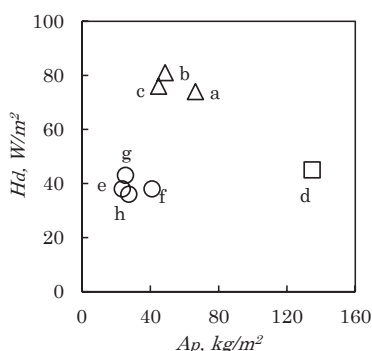


図2 乾熱損失量 H_d と見かけ密度 A_p との関係

〔△：網状構造体，□：ゴムスポンジ，○：ウレタンスポンジ〕

の網状構造体群では H_d が約 80 W/m^2 であるのに対して、試料 d～h のスポンジ群では約 40 W/m^2 前後で放熱量が約 $1/2$ であった。また、これらの各群内では、 H_d は見かけ密度に依存せず、スポンジ群のゴムあるいはウレタンといった素材にも依存しないことがわかった。一般的な布においては、見かけ密度が高くなるほど熱伝導率の低い空気の含有量が少なくなるため、 H_d が増大する傾向がみられるが^{6,7)}、スポンジ素材の場合には A_p との関係はみられなかった。

(2) Wet 法による熱・水分移動特性

温度差と水蒸気圧差が同時に存在する系における総熱損失量 H_t (W/m^2) と A_p との関係、および水の蒸発潜熱を 2430 J/g として、(1)式により算

出した水分蒸散量 V_w ($\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) と A_p との関係を図3に示す。

$$V_w = \frac{(H_t - H_d)}{2430} \times 3600 \dots\dots\dots (1) \text{式}$$

前述の熱移動ではみられなかったスポンジ系のウレタンとゴムとの間に明らかな相違がみられ、試料 d のゴムスポンジで V_w が非常に低いことがわかった。これはゴムスポンジが独立気泡構造体であり、水蒸気の透過がなかったことによるものと思われる。これに対して、大きな直通気孔をもつ網状構造体では、 $200 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ を越える水分蒸散量が観察された。ウレタンスポンジにおいても連続気泡体であったことにより $100 \sim 150 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ の水蒸気透過が認められた。また、総熱損失量 H_t においては V_w と類似の挙動がみられた。

エネルギー代謝の大きい競技時の温熱的快適性や自律性体温調節を考慮すると、乾熱移動よりも潜熱移動の影響が大きく、このことは円滑な水分蒸散が見込めるプロテクター素材であることが重要であることを示唆している。

(3) Wet 法における模擬皮膚と試料との間の温湿度

模擬皮膚と試料との間の温湿度を図4に示す。試料 d で湿度が急速に上昇し、湿度センサーが湿潤することが懸念されたので、測定を3分で打ち切った。しかし、どの試料においても温湿度と

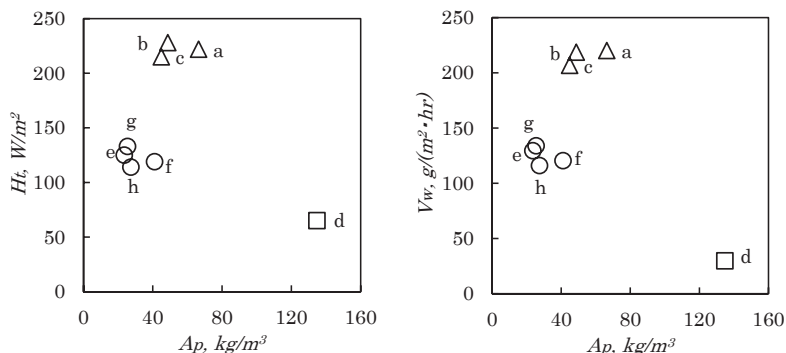


図3 総熱損失量 H_t および水分蒸散量 V_w と、見かけ密度 A_p との関係

〔△：網状構造体，□：ゴムスポンジ，○：ウレタンスポンジ〕

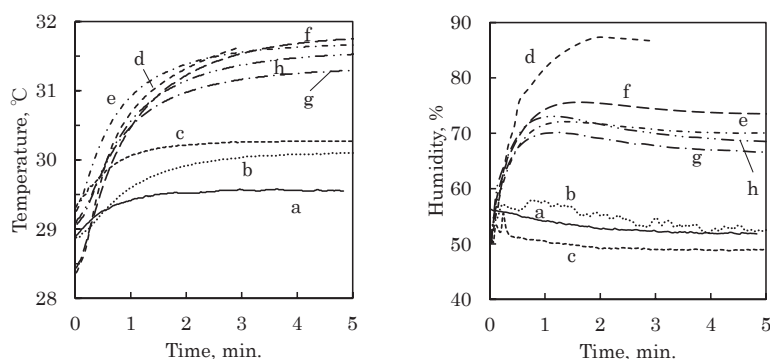


図4 模擬皮膚と試料との間の温度、湿度

もに測定開始から2分以降でほぼ平衡に達していることがわかり、温度では、試料a～cで約29～30℃、試料d～hのウレタン系スポンジにおいては測定開始2分で31℃を超えており、大きく2群に分離している。一方、湿度をみると、試料a～cで約50%と低い、試料dでは他のウレタン系スポンジ（試料e～h）に比べてはるかに高い湿度となった。

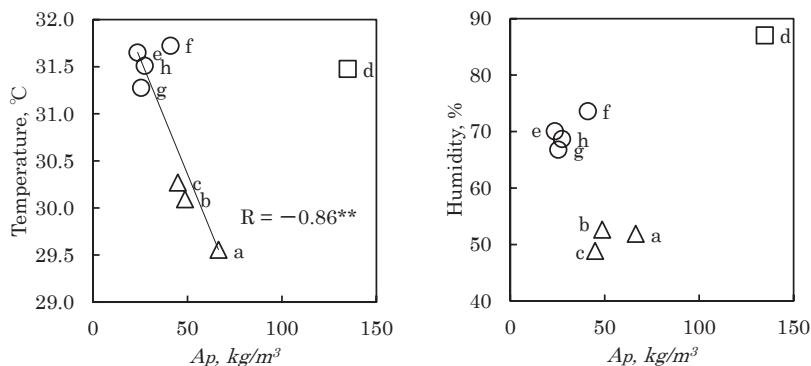
測定開始2～3分の温湿度の平均値を用いて、見かけ密度との関係を図5に示す。試料dを除くと、温度と見かけ密度との関係において負の有意な相関 ($R = -0.86^{**}$) がみられた。これは、前述したように、見かけ密度が小さいほど熱伝導率の低い空気を多く含むためと考えられる。しかし、見かけ密度が高い試料dで温度が高い。この理由としては、独立気泡体であるため水蒸気が透過

しなかったことによるものであり、湿度の変化挙動をみてもわずか2分ほどで90%に達しており、潜熱移動が極めて少なかったことによるものであると考えられる。湿度では、試料a～cの大きな直通気孔をもつ網状構造体、試料dの独立気泡体、試料e～hの連続気泡体であるなどのセルの構造による相違が大きいことが明らかである。

3.2 開放系を用いた場合のWet法によるプロテクター素材の熱・水分移動特性

(1) 試料側面からの熱・水分移動の効果

本研究で用いた試料の厚さが10mmと厚かったため、実際の着用を考慮して、側面からの熱・水分移動の寄与の度合いを検討した。乾熱損失量 H_d および水分蒸散量 V_w における開放系と閉鎖系との関係を図6に示している。

図5 模擬皮膚と試料との間の温湿度と見かけ密度 A_p の関係

〔△：網状構造体，□：ゴムスポンジ，○：ウレタンスポンジ〕

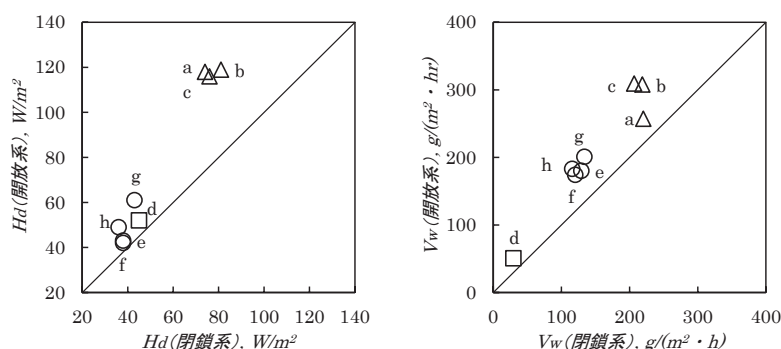


図6 閉鎖系と開放系における乾熱損失量 H_d および水分蒸発量 V_w

(△：網状構造体, □：ゴムスポンジ, ○：ウレタンスポンジ)

H_d および V_w ともに閉鎖系に比べて開放系で全体に高くなる傾向がみられた。特に、 H_d における試料 a～c の増加が大きく、約 80 W/m^2 から約 120 W/m^2 へと1.5倍に増加した。しかし、 V_w では試料 a～c および試料 e～h で全体にやや増加したに過ぎず、試料 a～c で特に大きな増加はみられなかった。試料 d では、閉鎖系と開放系での相違はほとんど認められなかった。これらのことから、網状構造体のプロテクターを導入する場合には、側面からの放熱を考慮したパンツへの取り付けが有効であると推察された。

(2) 開放系におけるプロテクター素材の単層と積層による熱・水分移動特性の相違

別報の圧衝撃緩和性に関する研究¹⁾において、プロテクター素材1枚では床との圧衝撃緩和が足りないという競技者からの意見があり、2層あるいは3層でトータル20mmとなる積層プロテクターを用いて着用実験を行った。しかし、積層させることによる温熱的快適性への影響が懸念された。

そこで圧衝撃緩和性をも併せもつプロテクターを提案するために、図7に示す組み合わせで、プロテクター2層および3層にて実験を行い、温熱的特性からみた積層方法を検討した。最も熱および水分移動の大きかった網状構造体の中から試料 b を選択して組み合わせた。3層の実験では、試料 b を中間層に挿入した。

結果を図8に示す。肌側の素材によって、大きく3群に分離された。肌側が試料 b の場合でも H_d および V_w が大きい。試料 d との組み合わせであっても熱・水分移動の低下は少なく、かなりの放熱がみられることから、試料 b の側面からの熱・水分移動が影響していると考えられる。肌側に試料 f がある場合には、 H_d は低かったが、 V_w が高く潜熱移動が大きかった。肌側に試料 d がある場合には、 H_d は中程度であるが、 V_w が非常に低く大量の発汗を伴うゴールボール競技においては適さないと推測された。なお、肌側以外の試料については熱・水分移動特性に大きな影響をもたないことがわかった。

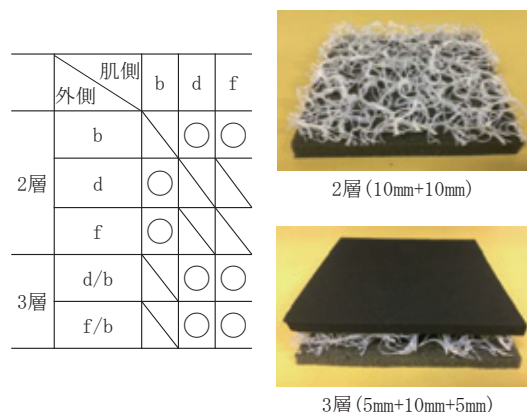


図7 クッション材2層および3層における積層の組み合わせ

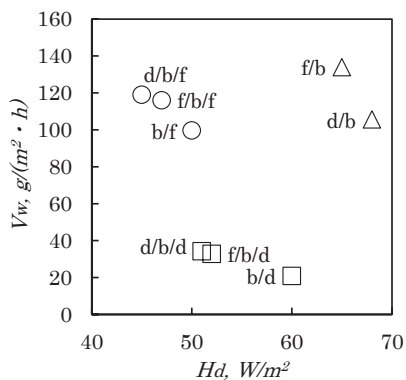


図8 乾熱素損失量 H_d と水分蒸散量 V_w の関係

〔肌側素材／△：網状構造体，□：ゴム〕
〔スポンジ，○：ウレタンスポンジ〕

(3) 積層試料における模擬皮膚との間の温湿度

結果を図9に示す。積層試料を実線で、単層試料を破線で示している。前項の V_w から予測されるように、肌側素材（試料d、f）によって温湿度の変化挙動は大きく異なるが、2層であっても3層であっても、またその組み合わせに依らず、湿度の上昇挙動はほぼ同様であった。試料dおよびfにおいては、積層しても側面が開放状態であれば、単層・閉鎖時の湿度上昇より抑制されることがわかる。試料bを肌側に置いた場合に、組み合わせに依らず単層とほぼ同様であった。

以上のことより、温熱的観点からは試料bを肌側に置いた場合に最も放熱が促進され、望ましいと考えられた。しかし、別報では繊維が太く体

に当たると痛いなどの意見があったことを考慮すると、肌側に試料fを配置することも考えられ、その場合の湿度上昇は約65%と許容の範囲であることが明らかとなった。

4. 結 語

本研究では、8種のプロテクター素材を用いて、熱・水分移動特性の観点からゴールボール用パンツに取り付けるに適したプロテクター素材を明らかにすることを目的とした。

乾熱損失量 H_d は、見かけ密度に依存せず、大きな直通気孔をもつ網状構造体で最も大きかった。水分蒸散量 V_w は、網状構造体で最も大きく、次に連続気泡構造体であるウレタンスポンジであった。独立気泡構造体であるゴムスポンジでは水蒸気の透過がほとんどみられなかった。別報において、圧衝撃緩和性の観点から積層試料が望ましいことが明らかとなったことから、試料を2層あるいは3層に組み合わせた系でも実験を行った結果、網状構造体試料を肌側においた場合で最も総熱損失量が高く、衣服内湿度を低く抑えられることがわかった。ウレタンスポンジを肌側に置いた場合においても比較的良好な熱・水分移動特性があることがわかった。また、肌側に置く試料の特性が重要であり、積層上部の試料の特性の影響は少ないことが明らかとなった。

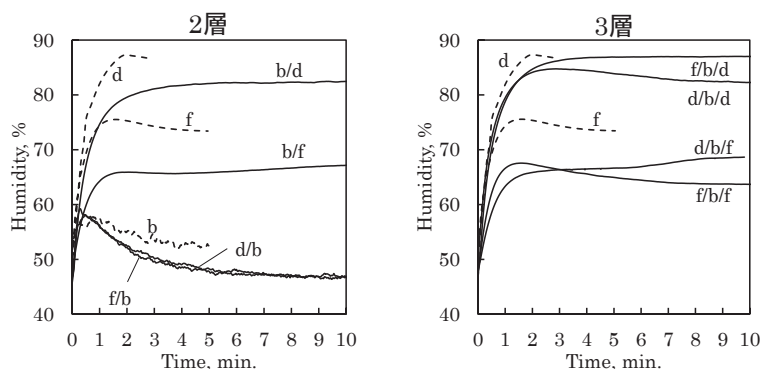


図9 模擬皮膚と各試料との間の湿度

参考文献

- 1) 坂下理穂, 加藤礼菜, 諸岡晴美, 渡邊敬子, 芝崎 学; 「圧衝撃緩和性からみたゴルフボール用プロテクター素材の検討」, 繊維製品消費科学, 投稿中
- 2) 三木将仁, 森田真史, 鈴木保, 土井一浩, 小林英敏; 「ヒッププロテクターの衝撃力緩和効果に関する力学的評価」バイオメカニズム学会誌, 33(4), pp.264-270 (2009)
- 3) 佐々木久登, 小田桐匡, 垣内秀雅, 長岡由樹; 「ヒッププロテクターの性能比較」日本義肢装具学会誌, 21(1), pp.19-24 (2005)
- 4) 滝本成人, 堀越哲美; 「ウレタンフォーム複層クッション材の経時変化に関する研究 (2)」 椋山女学園大学研究論集 第47号, pp.59-65 (2016)
- 5) 小松陽子, 小淵信一, 中村隆徳ほか; 「通気性とプロテクター性を両立する三次元スプリング構造体」繊維製品消費科学, 59(4), pp.288-292 (2018)
- 6) 諸岡晴美, 中村智子, 諸岡英雄; タオル織物の温熱的特性, 繊維学会誌, 59(5), pp.181-186 (2003)
- 7) 諸岡晴美, 丹羽雅子; 毛布の熱・水分移動特性, 第15回日本熱物性シンポジウム講演論文集, pp.343-346 (1994)